



بررسی اثر پیش گرم بر روی کاهش تنش های پسماند در جوشکاری تعمیری لوله های فولادی

مهران چرخي¹، داود اکبري^{2*}

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی: 14115-111، daakbari@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 14 شهریور 1396

پذیرش: 09 آبان 1396

ارائه در سایت: 10 آذر 1396

کلید واژگان:

پیش گرم

تنش های پسماند

جوشکاری تعمیری

تحلیل اجزای محدود

چکیده

در این تحقیق به مطالعه اثر حرارت پیش گرم بر جوشکاری تعمیری در لوله های فولادی و تحلیل ترمو-الاستیک-پلاستیک این فرایند به کمک روش المان محدود پرداخته شده است. برای تأیید مدل المان محدود از داده های تجربی جوشکاری تعمیری لوله فولاد کربنی که با روش کرنش سنجی سوراخ بدست آمده بودند، استفاده شده است. ارتباط خوبی بین نتایج المان محدود و داده های تجربی بدست آمد. نتایج نشان داد روش محاسباتی توسعه یافته در این مطالعه یک روش مؤثر برای پیش بینی تنش پسماند در جوشکاری تعمیری لوله های مورد نظر است. اثر پیش گرم بر روی کاهش تنش های پسماند جوشکاری در تعمیر لوله های فولاد زنگ نزن و فولاد کربنی با استفاده از مدل المان محدود تأیید شده مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد که با افزایش دمای پیش گرم، تنش های پسماند محوری کششی هم در سطح داخلی و هم در سطح خارجی لوله فولاد زنگ نزن و فولاد کربنی به ترتیب تا 35 و 50 درصد کاهش یافته، ولی تنش های فشاری در سطح خارجی تغییر چندانی نکرده است. همچنین در لوله فولاد زنگ نزن با افزایش دمای پیش گرم تنش پسماند محیطی کششی در سطح خارجی و در لوله فولاد کربنی تنش محیطی کششی در سطح داخلی کاهش می یابد اما تنش های فشاری تغییر قابل توجهی نمی کنند. بطور کلی پیش گرم بر اندازه و توزیع تنش پسماند محیطی در سطح داخلی لوله فولاد زنگ نزن تأثیر مهمی ندارد. همچنین در دماهای پیش گرم بالا تنش های پسماند محوری توزیع وسیع تری خواهند داشت.

Application of pre-heating in the reduction of residual stress in the repair welds of steel pipes

Mehran Charkhi, Davood Akbari*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 14115-111, Tehran, Iran, daakbari@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 September 2017
Accepted 31 October 2017
Available Online 01 December 2017

Keywords:
Preheat
Residual stresses
Repair welding
FEM analysis

ABSTRACT

In this paper, the study application of pre-heating on the repair welds in the steel pipes and analysis of thermo-elastic-plastic molding of this process was investigated using finite element method. In order to verify the model, experimental data for repair welding of carbon steel pipe, obtained by deep hole drilling method, were utilized. Good agreement was observed between the finite element and experimental data. The results indicated that the developed computational method is an effective tool to predict the residual stress of pipes in the repair welded. The present finite element model was developed in repair welded carbon steel and stainless steel pipes to consider the effect of preheating. It was observed that by increasing the preheating temperature in the repair welded pipes, tensile axial residual stresses on the inner surface and outer surface of the carbon steel and stainless steel pipes decreased 35 and 50 percent respectively, but the compressive axial residual stresses on the outer surface have small variation. Moreover, by increasing the preheating temperature tensile hoop residual stresses on the outer surface on the stainless steel side and tensile hoop residual stresses on the inner surface on the carbon steel side decreased, but only a small variation was observed on the compressive hoop residual stresses. In general, there is no significant effect on the magnitude and distribution of hoop residual stresses on the inner surface of the stainless steel pipe. Also, high preheating temperatures will have wider distribution of axial residual stresses.

1- مقدمه

پل ها و نیروگاه ها کاربردهای فراوانی دارد. در تعمیر قطعات فلزی به روش جوشکاری عوامل زیادی مانند جنس فلز پایه، نوع و جنس الکترود، انتخاب روش مناسب جوشکاری، طرح اتصال مناسب، مهارت جوشکار، عملیات

جوشکاری یکی از مهم ترین فرایندهای ساخت و تولید در صنعت می باشد و در صنایع مختلف نظیر خودروسازی، نفت و گاز و پتروشیمی، تأسیسات و

Please cite this article using:

M. Charkhi, D. Akbari, Application of pre-heating in the reduction of residual stress in the repair welds of steel pipes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 1-10, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بودند مدل‌سازی کردند. برای اندازه‌گیری تنش پسماند تکنیک‌های سوراخ‌کاری، سوراخ مرکز افزایشی ICHD، پراش اشعه ایکس و سوراخ‌کاری عمیق DHD را بکار بردند. آنها نتیجه گرفتند که بکاربردن شرایط مرزی متقارن در مدل‌سازی عددی منجر به پیش‌بینی‌های تنش غیرواقعی بخصوص در نزدیکی دنباله دانه‌های جوش می‌شود.

اثر حرارت ورودی روی تنش‌های پسماند جوش در اتصالات غیرهمجنس فولاد زنگ‌زن 304 و فولاد کربنی A106، توسط اکبری و ستاری‌فر [8] بررسی شد. نتایج کارشان نشان داد که با تغییر حرارت ورودی حداکثر تنش‌های پسماند محیطی تفاوت چندانی نمی‌کند. با کاهش حرارت ورودی جوش حداکثر تنش فشاری محوری و محیطی در طرف فولاد زنگ‌زن کاهش یافتند.

فوکس و همکاران [9] آنالیز عددی و تجربی اندازه‌گیری تنش پسماند در هدر تعمیر شده با جوش تعمیریه را بررسی کردند. با اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در یک نمونه هدر بخار از جنس فولاد زنگ‌زن H316 به روش DHD جهت مشخص کردن توزیع تنش پسماند در سرتاسر ضخامت لوله که پیرامون آن جوش تعمیریه شده، به ارتباط خوبی بین نتایج عددی و تجربی رسیدند. آنها نشان دادند که حجم محدودی از تنش‌های فشاری در سطح خارجی هدر ایجاد می‌شود. مهم‌ترین نتایج کارشان این بود که تنش‌های پسماند کششی در سطح داخلی لوله جوشکاری تعمیریه شده تشکیل می‌شود که با عملیات حرارتی مناسب می‌توان تنش‌های پسماند کششی را کاهش و در نتیجه خطر شکست قطعه را کاهش داد.

ژبانگ و همکاران [10] به آنالیز عددی اثر حرارت ورودی و تعداد لایه جوشکاری بر روی تنش پسماند در جوشکاری تعمیریه برای یک صفحه روکش‌دار از جنس فولاد زنگ‌زن پرداختند. اغلب ترک‌هایی در لایه روکش هنگام ساخت یا سرویس ایجاد می‌شوند را می‌توان با استفاده از جوشکاری تعمیریه ترمیم کرد. نتایج نشان دادند تنش‌های پسماند بزرگی در جوشکاری تعمیریه ایجاد می‌شود. با افزایش حرارت ورودی و تعداد لایه‌های جوشکاری، تنش‌های پسماند کاهش می‌یابند. این راهکار برای بهینه کردن جوشکاری تعمیریه این نوع قطعات مناسب می‌باشد.

کیم و فریک [11] تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری سر به سر لوله‌هایی از جنس فولاد زنگ زن آستینیتی را با استفاده از ابزار آلمان محدود به دست آوردند. آنها برای مدل‌سازی از برنامه کامپیوتری فرسا بر پایه نرم‌افزار آباکوس استفاده کردند. همچنین آنالیز آنکوپل ترمو-مکانیکال و با فرض رفتار الاستیک-پلاستیک برای محاسبه تنش‌های پسماند به کار گرفته شد. با بررسی اثر پارامترهای جوشکاری و به‌خصوص شکل یخ و پاس‌های جوشکاری به این نتیجه رسیدند که تأثیر عمده تشکیل تنش‌های پسماند در پاس آخر جوشکاری است. همچنین خنک کردن ریشه جوش در حین انجام پاس آخر جوشکاری باعث ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در ریشه جوش می‌گردد.

پنگ و هیسانگ [2] تنش پسماند در طول یک پاس جوشکاری قوس الکتریکی در صفحات فولادی را با استفاده از روش آلمان محدود پیش‌بینی کردند. همچنین آنها اثر سرعت الکتروود، اندازه نمونه، قید و فیکسچر و پیش‌گرم را روی اندازه و توزیع تنش پسماند، مطالعه کردند. مهم‌ترین نتایج کارشان این بود که نشان دادند تنش پسماند طولی کششی و عرضی کششی بسیار بزرگی در نزدیکی خط جوش و تنش فشاری به دور از منطقه جوش ایجاد می‌شود و در فواصل خیلی دور از منطقه جوش تنش‌ها نزدیک به صفر هستند.

با وجود تأثیر زیاد پیش‌گرم در توزیع تنش‌ها، بررسی‌های انجام شده

حرارتی پیش‌گرم و پس‌گرم مناسب و پارامترهای جوشکاری بر کیفیت جوش و پیشگیری از انواع ترک‌ها و تنش‌های پسماند و اعوجاجات جوشکاری تأثیرگذار می‌باشند. در برخی موارد، تنش‌های پسماند جوش می‌تواند اثر منفی روی خواص مکانیکی اتصالات مثل مقاومت به شکست خستگی داشته باشد [1]. تنش‌های پسماند اثر قابل توجهی روی عمر خستگی سازه تحت بار دارد که بررسی عواملی چون پیش‌گرم در کاهش تنش‌ها حائز اهمیت می‌باشد. پیش‌گرم نمودن جهت کاهش عیوب بدلیل محدودیت‌هایی که در تعمیر وجود دارد، بیشتر برای جوشکاری غیرتعمیریه استفاده می‌شود. پارامترهای مختلفی ممکن است در اندازه و توزیع تنش‌های پسماند اثر بگذارند. در فرایند جوشکاری تعمیریه پارامترهای مربوط به خواص مواد و عوامل ساختاری اثر قابل توجهی بر اندازه و توزیع تنش پسماند دارند. پارامترهای فرایند شامل نوع فرایند جوشکاری، سرعت حرکت قوس، ولتاژ و شدت جریان می‌باشند. شکل شیار جوش تعمیریه، نوع اتصال جوش و ضخامت فلز پایه برخی از فاکتورهای ساختاری هستند که ممکن است روی تنش‌های پسماند در جوشکاری تعمیریه تأثیرگذار باشند. محققان روش‌های مختلفی از جمله عملیات حرارتی، چکش‌کاری، پیش‌گرم و استفاده از ارتعاشات را جهت کاهش تنش‌های پسماند جوش توسعه داده‌اند [2]. علاوه بر این با کنترل پارامترهای جوشکاری در حین انجام عملیات تعمیر می‌توان، تنش‌های پسماند جوش تعمیریه را کاهش داد. انتخاب پارامترهای مناسب جوشکاری و طراحی اتصال، یک راه ساده و کارآمد برای کاهش تنش پسماند ناشی از جوش ترمیمی است. از طرفی کاهش تنش پسماند برای بسیاری از سازه‌های جوشکاری شده قابل اجرا نمی‌باشد. از این رو توسعه‌ی پارامترهای موجود برای پیش‌بینی دقیق تنش پسماند جوش تعمیریه برای دستیابی به طراحی مناسب، ضروری است. [3].

امروزه روش‌های عددی در محاسبه تنش پسماند سازه‌های جوشکاری شده می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند. بررسی‌های زیادی روی مدل‌سازی و تحلیل حرارتی در جوش انجام گرفته است و محققان به مطالعه اثر برخی از پارامترهای فوق در پیشینه حرارتی جوش پرداخته‌اند. در سال 1984، گلداک [4] یک روش جدید آلمان محدود برای تعیین توزیع حرارتی جوش ارائه کرد. او از رویکرد شار حرارتی در مدل‌سازی استفاده کرد. او همچنین تنش‌های حرارتی در سازه‌های جوشکاری شده را نیز مدل‌سازی کرد [5].

دانگ و همکاران [6] به تحلیل تنش‌های پسماند در جوشکاری تعمیریه با هر دو روش اندازه‌گیری تجربی و مدل‌سازی عددی پرداختند. آنها دریافتند که جوشکاری تعمیریه باعث افزایش تنش‌های پسماند عرضی می‌شود. در پایان تعمیر میزان تنش‌های عرضی بشدت افت پیدا می‌کنند و تنش‌های کششی به فشاری تبدیل می‌شوند. آنها به این نتیجه رسیدند که مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در جوشکاری تعمیریه نسبت به جوش‌های اولیه عبارتند از: پاس‌های یکسان، حرارت ورودی، درجه حرارت بین پاسی و پاس‌های متوالی. هر چقدر طول تعمیر کوتاه‌تر باشد افزایش تنش‌های عرضی بیشتر است. اما برای تعمیریهایی با طول زیاد، تنش‌های پسماند عرضی، در داخل منطقه مرکزی طول تعمیر، رویکردهای جوش اولیه را دارد.

براون و همکاران [7] در مورد پیش‌بینی و اندازه‌گیری تنش پسماند در جوش‌های تعمیریه صفحات فولادی پژوهش‌هایی انجام دادند. آنها برای تعیین تنش پسماند در فرایند جوشکاری تعمیریه فولادهای سری‌های مستطیل شکل P275-S690 از روش مدل‌سازی عددی استفاده کردند. یک جوش سر به سر دو ورق ساده به ابعاد 800×1000 میلی‌متر با ضخامت 100 و 50 میلی‌متر که جوش‌های تعمیریه 50%، 75% و 100% ضخامت ورق

جدول 1 پارامترهای فرایند جوشکاری تعمیریه

Table 1 Parameters of the repair welding process.

شماره پاس	ولتاژ (V)	شدت جریان (A)	فیبر	روش جوشکاری	سرعت جوشکاری (mm/s)
1	21.5	95±5	E 7018	SMAW	1.75

مرکزی جوش انجام گرفت. بدین منظور کرنش‌سنج‌ها روی سطح خارجی لوله مطابق شکل 2 چسبانده شدند.

بر اساس استاندارد ASTM E837 سوراخ‌کاری با سرعت بالا برای سوراخ کردن نقطه مرکزی بین کرنش‌سنج‌ها انجام گرفت و کرنش‌های آزاد شده در حین سوراخ‌کاری اندازه‌گیری شدند. سپس تنش‌های پسماند اصلی در قطعات، با جایگذاری کرنش‌های آزاد شده در روابط (1) و (2)، محاسبه شدند:

$$\sigma_{\max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (2)$$

که در آن $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ کرنش‌های اندازه‌گیری شده توسط کرنش‌سنج‌ها هستند، A و B ضرایب وابسته به قطر سوراخ و خواص مکانیکی فلز پایه می‌باشند [12]. برای جلوگیری از تأثیر تنش‌های مربوط به نقاط شروع و پایان جوشکاری قوس الکتریکی در محاسبات تنش پسماند، اندازه‌گیری‌ها در دورترین نقاط از محل شروع و پایان جوش ترمیمی لوله انجام گرفته است.

3- شبیه سازی المان محدود جوش

در مطالعه حاضر، روش المان محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس برای تخمین توزیع درجه حرارت در حین فرایند جوشکاری تعمیریه و همچنین توزیع تنش پسماند در جوش مورد نظر استفاده شده است. جهت تحلیل تنش‌های پسماند از مدل سه بعدی و از روش مدل‌سازی کوپل در شبیه‌سازی رفتار مکانیکی - حرارتی قطعه جوش داده شده، استفاده شده است. بنابراین



Fig. 2 Location of strain gauges

شکل 2 تعیین موقعیت و نصب کرنش‌سنج‌ها

نشان می‌دهد تحقیقات بسیار محدودی اثر پارامتر پیش گرم در جوشکاری تعمیریه را بر اندازه و توزیع تنش‌های پسماند در نظر گرفته‌اند.

در این مقاله لوله از فولاد کربنی بوسيله جوشکاری تعمیریه تک پاسه با استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی المان محدود مدل‌سازی شده و توزیع تنش پسماند بدست آمده است. نتایج عددی بدست آمده با استفاده از اندازه‌گیری تنش پسماند، به روش سوراخ‌کاری تأیید شد. با هدف کاهش تنش‌های پسماند جوشکاری از طریق انتخاب پارامترها و شکل مناسب اتصال، اثر پارامتر پیش گرم، روی اندازه و توزیع تنش پسماند مورد بررسی قرار گرفت.

2- بررسی‌های تجربی

در مطالعه حاضر، تنش‌های پسماند در جوشکاری تعمیریه لوله فولاد کربنی با استفاده از روش کرنش‌سنجی سوراخ اندازه گرفته شده است. اطلاعات تجربی برای بررسی نتایج بدست آمده از روش تحلیل المان محدود برای بررسی جوش تعمیریه مورد نظر بکار گرفته شده است.

1-2- آماده سازی نمونه

لوله فولاد کربنی با مشخصات هندسی شامل: قطر اسمی 4 اینچ، قطر خارجی 102.3 میلی‌متر، ضخامت 5.8 میلی‌متر و طول 200 میلی‌متر که یک شیار به عرض 3 میلی‌متر و طول 82 میلی‌متر با استفاده از سنگ دستی ایجاد شده بود، تهیه شد. جهت بررسی تنش‌های پسماند جوشکاری تعمیریه از جنس فولاد کربنی A106-B استفاده شده است.

لوله آماده شده جهت جوشکاری تعمیریه با شیار ایجاد شده به عمق ضخامت لوله بصورت شماتیک در شکل 1 نشان داده شده است.

جوشکاری تعمیریه فولاد کربنی با یک پاس به روش الکتروود دستی جوش داده شد. الکتروود مصرفی E 7018 (AMA 1230F) با قطر 2.5 میلی‌متر بود که استحکام نسبتاً بالایی دارد. پارامترهای جوشکاری تعمیریه در حین انجام جوش به دقت اندازه‌گیری شد و در جدول 1 ارائه شده است. این پارامترها در مدل‌سازی المان محدود نیز به دقت بکار گرفته شدند.

2-2- اندازه‌گیری تنش‌های پسماند

در این بررسی، تنش‌های پسماند با روش کرنش‌سنجی سوراخ که بعنوان یک روش استاندارد در استاندارد ASTM E837 معرفی شده است، اندازه‌گیری شد [12]. اندازه‌گیری تنش پسماند در جوشکاری لوله مورد نظر در سه نقطه، یک نقطه در مرکز جوش و دو نقطه در فواصل 10 و 20 میلی‌متری از خط

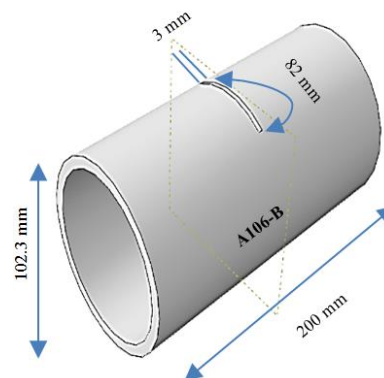


Fig. 1 Schematic view of the specimen used in this experiment

شکل 1 شماتیک از لوله آماده شده جهت جوشکاری تعمیریه در این آزمایش

توسط گلدک و همکاران استفاده کرد، که طبق این داده‌ها فاصله در مقابل منبع حرارت برابر با نیمی از عرض جوش و فاصله از پشت منبع حرارت برابر با دو برابر عرض جوش می‌باشد [4]. پیشنهادهای مذکور در این مقاله استفاده شدند و برای مدل کردن حرکت منبع حرارتی یک زیربرنامه در مدل المان محدود نوشته شد.

ابعاد مقطع منبع حرارتی جوشکاری که با a و b و c نامگذاری شده‌اند، در شکل 5 نشان داده شده است. ضرایب ثابت $a_f = 2.5 \text{ mm}$ و $a_r = 1 \text{ mm}$ و $c = 5.4 \text{ mm}$ و $b = 3.25 \text{ mm}$ تعریف شدند. پارامترهای جوشکاری استفاده شده در این تحلیل که مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری شده تجربی می‌باشند، در جدول 1 ارائه شده است. انتقال حرارت صورت گرفته با محیط در طول فرایند جوشکاری تعمیری، بصورت تابشی و همرفت در نظر گرفته شده است که ضریب انتقال حرارت کل α_h بصورت روابط (6) و (7) قابل بیان است [14,13]:

$$\alpha_h = 0.0668 T \text{ (W/m}^2\text{)} \quad 0 < T < 500^\circ\text{C} \quad (6)$$

$$\alpha_h = 0.231 T - 82.1 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad 500 < T^\circ\text{C} \quad (7)$$

این روش با اعمال یک زیربرنامه توسعه یافته برای شبیه‌سازی المان محدود اعمال می‌شود.

ضریب هدایت حرارتی ناحیه ذوب جهت شبیه‌سازی نفوذ جریان حوضچه جوش دو برابر شد [15]. برای مدل کردن اثرات حرارتی انجماد در حوضچه جوش، گرمای نهان ذوب در نظر گرفته شده است. از روش آنتالپی حرارتی جهت بکاربردن گرمای نهان در تجزیه و تحلیل شبیه‌سازی المان محدود استفاده شد [16]. نوع المانی که برای مدل‌سازی حرارتی استفاده شد، قابلیت هدایت حرارتی سه بعدی دارد. این المان دارای هشت گره می‌باشد که هر گره دارای یک درجه آزادی (دما) و خواص مواد یکسان است. در مدل المان محدود تعداد 7946 المان C3D8R هشت گره‌ای که با انتگرال‌گیری کاهش یافته، با 9876 گره وجود دارد.

2-3- تحلیل مکانیکی

کرنش کل در فرایند جوشکاری مجموع کرنش‌های الاستیک، پلاستیک و حرارتی و کرنش‌هایی که در نتیجه تغییرات حجمی ناشی می‌شوند، می‌باشد. در تحلیل مکانیکی، خواص مکانیکی وابسته به دمای ماده مثل مدول یانگ، نسبت پواسون و ضریب انبساط حرارتی جهت محاسبه کرنش‌های حرارتی و الاستیک استفاده شدند. همچنین، استحکام تسلیم وابسته به دما با معیار فون میسز برای محاسبه کرنش‌های پلاستیک استفاده شد [17].

روش انتخابی جهت انجام تحلیل بصورت کوپل بوده و تحلیل مکانیکی هم‌زمان با تحلیل حرارتی انجام شده است. با توجه به تقارن هندسه در جوشکاری تعمیری لوله مورد نظر، فقط نیمی از جوش مدل‌سازی شد و شرایط مرزی متقارن در سطح اتصال جوش تعمیری در نظر گرفته شد که این کار باعث کاهش زمان حل مسئله نیز می‌شود. به‌علت اینکه نیروها و تنش‌های پسماند داخلی در تعادل هستند، نیازی به استفاده از هیچ قید و شرایط مرزی خارجی در مدل نیست و تنها یک گره برای جلوگیری از حرکت صلب، ثابت شد.

3-3- تأیید المان محدود

برای تأیید صحت روش مدل‌سازی المان محدود انجام شده، لوله فولاد کربنی جوش داده شده که قبلاً شرح داده شد، آماده گردید و تنش‌های پسماند با روش کرنش‌سنجی سوراخ اندازه‌گیری شد. همچنین توزیع تنش پسماند در

جهت مشاهده پیشینه حرارتی فرایند جوشکاری تعمیری، هم تحلیل حرارتی و هم تحلیل مکانیکی در یک مرحله و با المان‌هایی که درجه آزادی حرارتی و مکانیکی دارند، انجام شد. در طول یک پاس جوش، تنش‌های حرارتی از اعمال توزیع درجه حرارت تعیین شده توسط مدل حرارتی به مدل مکانیکی محاسبه شد. جهت به‌روز کردن رفتار مدل مکانیکی قبل از اینکه نمودی کوتاه¹ بعدی اضافه شود، تنش‌های محاسبه شده در هر نمو کوتاه، به گره‌ها اضافه شدند. به‌دلیل غیرخطی بودن تحلیل مکانیکی فرایند جوشکاری، از روش نیوتن-رافسون استفاده شد. برخی از خواص وابسته به دما در فلزات پایه که در شبیه‌سازی المان محدود استفاده شد، در شکل 3 ارائه شده است. در مطالعه حاضر برای شبیه‌سازی پرشدن فلز جوش در حین جوشکاری از روش تولد المان‌ها استفاده شده است. در این روش، المان‌های اولیه فلز پرکننده با اعمال یک ضریب خیلی کوچک به ماتریس سفتی‌شان، غیر فعال می‌شوند. المان‌های غیر فعال شده دوباره در حین جوشکاری تعمیری با حرکت منبع حرارت جوشکاری و به‌صورت مرحله به مرحله فعال می‌شوند. تحلیل حساسیت اندازه‌های شبکه‌بندی اجزای محدود برای اطمینان از مناسب بودن شبکه و اطمینان از عدم وابستگی نتایج به درجه شبکه‌بندی انجام پذیرفت. مدل المان محدود استفاده شده در این مدل‌سازی در شکل 4 نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد، به منظور افزایش دقت مدل‌سازی در منطقه جوش تعمیری از درجه شبکه‌بندی ریزتری استفاده شده است. خط جوش و نواحی نزدیک خط جوش بصورت Structure و نواحی دور از منطقه جوش بصورت Free جهت کاهش زمان حل مساله مش‌بندی شده‌اند.

1-3- تحلیل حرارتی

تحلیل حرارتی برای تعیین توزیع دمای قسمت‌های جوش داده شده استفاده شده است. توزیع دمایی وابسته به دما با استفاده از روابط انتقال حرارت گذرا (3) در این فرایند بدست می‌آید [14]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t}(x, y, z, t) = -\nabla \cdot \vec{q}(x, y, z, t) + Q(x, y, z, t) \quad (3)$$

که در آن $\vec{q}$ ، T و Q به ترتیب بردار شار حرارتی، دما و نرخ تولید حرارت داخلی می‌باشند. همچنین ρ و c به ترتیب چگالی و ظرفیت گرمایی ویژه هستند و دلتا عامل گرادیان مکانی است. x و y و z مختصات می‌باشند.

در این مطالعه برای مدل کردن منبع حرارت حجمی فرایند جوشکاری قوس الکتریکی، توزیع حرارتی دو بیضی‌گون پیشنهاد شده توسط گلدک، استفاده شده است. توزیع منبع حرارتی گلدک که در شکل 5 نشان داده شده است، با معادلات (4) و (5) بیان می‌شود [14,4]:

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{a_f b c \pi^{3/2}} e^{(-3x^2/a_f^2)} e^{(-3y^2/b^2)} \quad (4)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{a_r b c \pi^{3/2}} e^{(-3x^2/a_r^2)} e^{(-3y^2/b^2)} e^{(-3z^2/c^2)} \quad (5)$$

روابط (5,4) به ترتیب بخش‌های جلویی و انتهایی منبع گرمایی هستند. در این معادلات x ، y و z به ترتیب مختصات مکان منبع حرارتی و f_f و f_r بیانگر کسر حرارت ورودی در نواحی جلویی و پشتی می‌باشند که مجموع این دو پارامتر مساوی دو است و در شبیه‌سازی‌ها مقدار هر کدام از آنها برابر یک در نظر گرفته شدند. Q توان منبع حرارتی جوشکاری است که می‌توان آن را از اطلاعات فرایند جوشکاری تعمیری تجربی بدست آورد. اگر ابعاد سطح مقطع حوضچه‌ی جوش موجود نباشند، می‌توان از داده‌های تجربی ارائه شده

¹ Increment

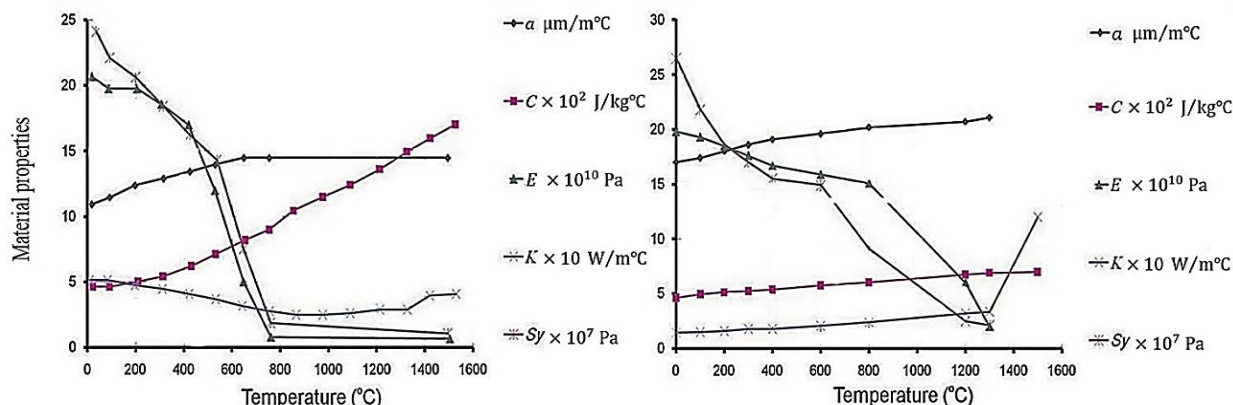


Fig. 3 Material properties of A106-B carbon steel and A240 TP 304 stainless steel [13,19]

شکل 3 خواص فولاد کربنی A106-B و فولاد زنگ‌نزن A240 TP 304 [19,13]

جوشکاری تعمیر لوله مورد نظر با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود محاسبه شد.

نتایج المان محدود لوله جوش داده شده که در این مطالعه بدست آمد، با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه شد. تنش‌های پسماند محیطی و محوری که با استفاده از روش کرنش‌سنجی سوراخ در نمونه مورد نظر اندازه‌گیری شده‌اند، به ترتیب در شکل‌های 6 و 7 نشان داده شده است.

بین نتایج عددی و تجربی ارتباط خوبی مشاهده شد. می‌توان نتیجه گرفت مدل المان محدود توسعه داده شده، پیش‌بینی قابل اطمینانی از تنش‌های پسماند حاصل از جوش تعمیر لوله مورد نظر ارائه کرده است. از این رو مطالعات پارامتریک می‌تواند با استفاده از این مدل معتبر انجام شود.

4- بحث و نتایج

4-1- اثر پیش گرم در تعمیر لوله فولاد کربنی

تنش‌های پسماند حاصل از جوش تعمیر تک پاسه لوله فولاد کربنی A106-B با چهار دمای پیش گرم مختلف اندازه‌گیری شد که نتایج در جدول 2 ارائه شده است. همه لوله‌ها هندسه یکسان اما دمای پیش گرم متفاوت دارند. تحلیل المان محدود در همه نمونه‌ها با استفاده از مدلی که قبلاً شرح

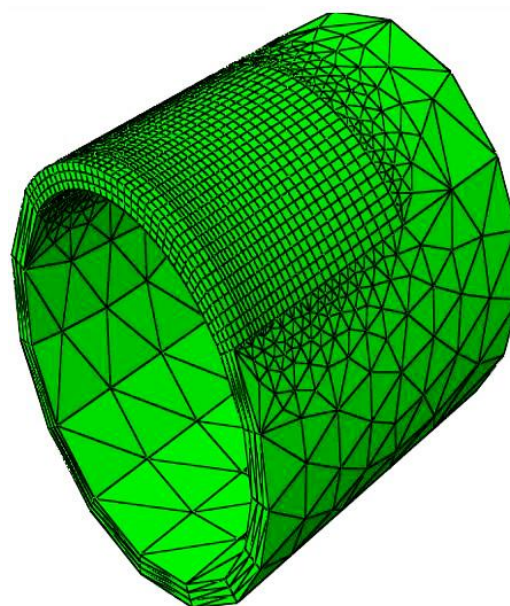


Fig. 4 Half of the finite element meshes for the repair welded pipe

شکل 4 نصف شبکه‌بندی المان محدود برای لوله تعمیر شده

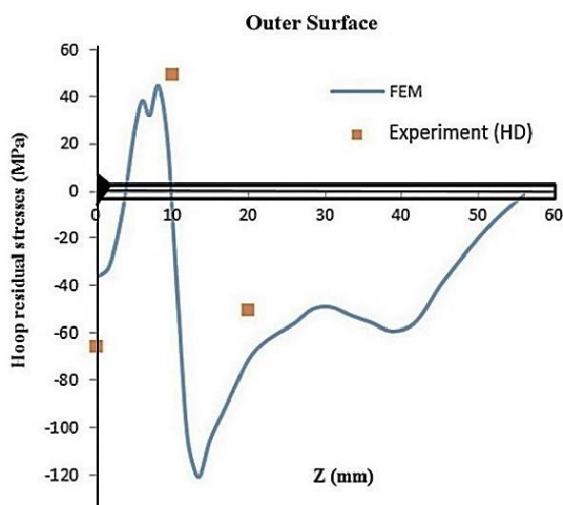


Fig. 6 Hoop residual stresses on the outer surface of the pipe in the axial direction

شکل 6 تنش‌های پسماند محیطی در سطح خارجی لوله در جهت محوری

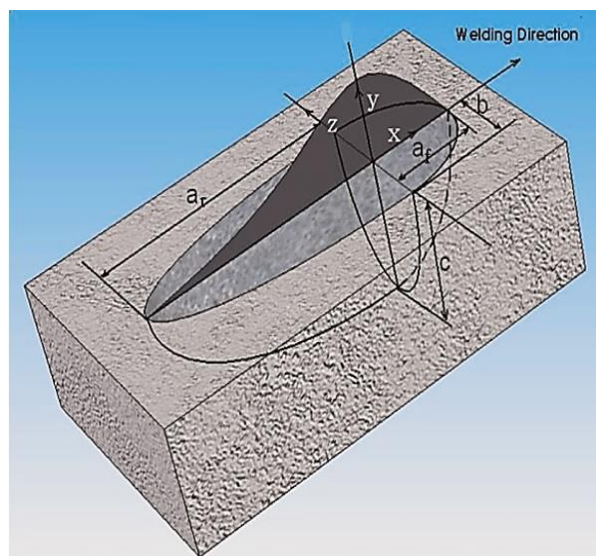


Fig. 5 Double ellipsoid heat source configuration [4]

شکل 5 ابعاد مقطعی منبع حرارتی دو بیضی‌گون [4]

جدول 2 دماهای پیش گرم در نظر گرفته شده برای جوش تعمیراتی

Table 2 Preheating temperatures used in FE analysis.

شماره قطعه	استاندارد	قطر خارجی (mm)	اندازه اسمی لوله (in)	دمای پیش گرم (°C)
1	SCH.40	102.3	4	250
2	SCH.40	102.3	4	350
3	SCH.40	102.3	4	600
4	SCH.40	102.3	4	700

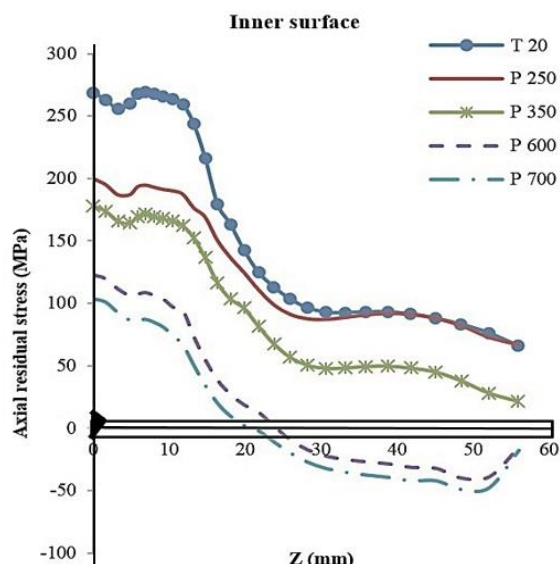


Fig. 8 Axial residual stress on the inner surface of the repaired pipe with different preheating temperatures

شکل 8 تنش پسماند محوری در سطح داخلی لوله تعمیراتی با دماهای پیش گرم مختلف

جوشکاری قسمت ریشه جوش اولین ناحیه‌ای است که سرد می‌شود و قسمت‌های بالایی جوش که هنوز گرم هستند بعنوان پیش گرم برای نواحی بیرونی جوش عمل کرده و تنش‌ها را کاهش می‌دهند. در نتیجه اندازه تنش‌ها در سطح داخلی جوش بزرگ‌تر از سطح خارجی آن می‌باشد.

در شکل 9 توزیع تنش پسماند محیطی در سطح داخلی لوله با دماهای پیش گرم مختلف نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند، تنش‌های پسماند محیطی کششی در سطح داخلی لوله با افزایش دمای پیش گرم کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند. اندازه تنش‌ها در دمای محیط تقریباً برابر 190 مگاپاسکال است که مقدار این تنش در خط مرکزی جوش در دمای پیش گرم 700 درجه سانتی‌گراد به 85 مگاپاسکال کاهش می‌یابد که کاهش 45 درصدی تنش‌ها را منجر می‌شود.

بعد از فاصله تقریباً 15 میلی‌متری از خط جوش تنش‌های محیطی کششی در دماهای پیش گرم بالا به تنش‌های فشاری تبدیل می‌شوند. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش دمای پیش گرم اثر مهمی بر روی کاهش تنش‌های محیطی فشاری در سطح داخلی لوله ندارد.

شکل 10 توزیع تنش‌های پسماند محوری در سطح خارجی لوله با چهار دمای پیش گرم مختلف را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند، تنش‌های پسماند محوری کششی در سطح خارجی لوله با افزایش دمای پیش گرم کاهش قابل توجهی پیدا کرده است. اندازه تنش پسماند کششی در دمای محیط برابر 215 مگاپاسکال می‌باشد که این مقدار با پیش گرم 700 درجه سانتی‌گراد به 105 مگاپاسکال می‌رسد که کاهش تقریباً 50 درصدی تنش را نشان می‌دهد. پیش گرم کردن اثر ناچیزی بر روی اندازه تنش‌های محوری

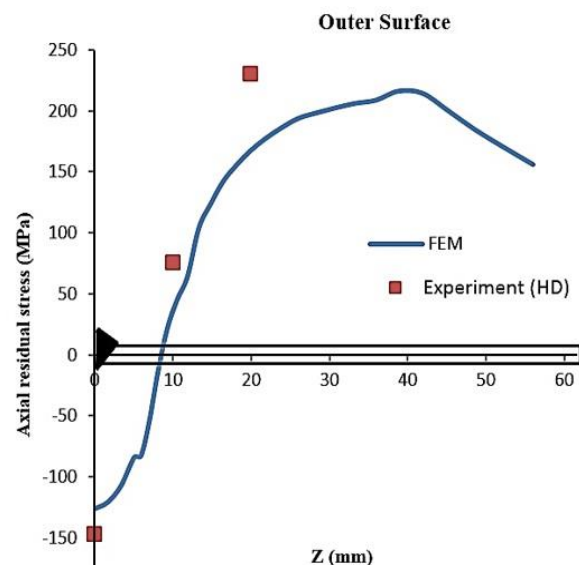


Fig. 7 Axial residual stresses on the outer surface of the pipe in the axial direction

شکل 7 تنش‌های پسماند محوری در سطح خارجی لوله در جهت محوری

داده شد، انجام گرفته است. در تمامی نمونه‌های مدل‌سازی شده، پارامترهای جوشکاری مانند شدت جریان، ولتاژ و سرعت حرکت الکترود ثابت در نظر گرفته شدند. در همه مدل‌سازی‌ها پیش گرم برای کل قطعه به غیر از سطوحی که بطور مستقیم انرژی حرارتی جوش وارد می‌شود، تعریف شده است.

برای شبیه‌سازی فرایند جوشکاری تعمیراتی لوله با دماهای پیش گرم مختلف در یک پاس، حرارت ورودی جوش متناسب با حجم پاس در نظر گرفته شد. حرارت ورودی در نمونه تجربی برای پاس مورد نظر با استفاده از پارامترهای جوشکاری اندازه‌گیری شده و فهرست شده در جدول 1 و معادله (8) محاسبه شد.

$$Q = \eta UI / v \quad (8)$$

که η ضریب راندمان قوس، U ولتاژ قوس، I شدت جریان جوشکاری و v سرعت جوشکاری است. ضریب راندمان برای فرایند جوشکاری الکترود دستی با توجه به مقالات جوشکاری، 0.7 در نظر گرفته شد.

تمامی نتایج نشان داده شده بعد از 180 ثانیه از اتمام فرایند جوش تعمیراتی می‌باشند که با بررسی زمان‌های مختلف خنک‌کاری لوله بعد از مدت زمان گفته شده تنش‌ها تغییر چندانی نمی‌کردند. شکل 8 تنش‌های پسماند محوری در سطح داخلی چهار نمونه با دماهای پیش گرم مختلف مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند تنش‌های پسماند محوری کششی در سطح داخلی لوله فولاد کربنی با افزایش دمای پیش گرم کاهش قابل توجهی پیدا کرده است به‌طوری‌که اندازه تنش پسماند در خط مرکزی جوش در دمای محیط برابر 270 مگاپاسکال می‌باشد که این مقدار با پیش گرم 700 درجه سانتی‌گراد به 100 مگاپاسکال کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج بدست آمده تنش‌های پسماند محوری کششی بعد از فاصله 25 میلی‌متری از خط مرکزی جوش در دماهای پیش گرم بالاتر از 600 درجه سانتی‌گراد به تنش‌های فشاری تبدیل می‌شوند.

نتایج نشان می‌دهند، تنش‌های پسماند محوری در سطح داخلی لوله نزدیک نقطه تسلیم بوده که ممکن است در شرایطی موجب شکست خستگی لوله مورد نظر شود ($270 > 242$). علت این امر این است که بعد از فرایند

پیش گرم مذکور در شکل 11 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، افزایش دمای پیش گرم اثر ناچیزی بر تنش های محیطی تا فاصله 10 میلی متری از خط مرکزی جوش دارد. ولی بعد از این فاصله تنش های پسماند محیطی فشاری با زیاد شدن دمای پیش گرم کمتر شده و در فواصل دور از خط جوش در دماهای پیش گرم بالا تنش های فشاری به تنش های کششی تبدیل می شوند که خود این تنش های کششی با افزایش دمای پیش گرم کاهش می یابند.

4-2- اثر پیش گرم در تعمیر لوله فولاد زنگ نزن

با توجه به نتایج بدست آمده در بخش قبلی، پیش گرم کردن تأثیر قابل توجه و مهمی بر روی کاهش تنش های پسماند در لوله فولاد کربنی داشت. در ادامه جهت بررسی بیشتر اثر پیش گرم بر روی بزرگی و توزیع تنش های پسماند در جوشکاری تعمیراتی لوله های فولادی، لوله ای از جنس فولاد زنگ نزن SS 304 که پر استفاده ترین نوع فولاد زنگ نزن می باشد، انتخاب و سه دمای پیش گرم 250، 340 و 600 درجه سانتی گراد با هدف مشاهده میزان اهمیت و مهم بودن تأثیر پیش گرم بر روی این نوع فولاد، اعمال شد. پیش گرم برای فولادهای زنگ نزن کمتر مورد استفاده قرار می گیرد و بیشتر برای فولادهای کربنی که با توجه به منابع مختلف میزان محدوده دمایی آن تقریباً بین 37 تا 700 درجه سانتی گراد می باشد. میزان دمای پیش گرم وابسته به کربن معادل (جنس فلز پایه) و ضخامت قطعه است. پیش گرم فولاد زنگ نزن آستینیتی برای بررسی اثر کاهش تنش ها در برخی از منابع مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال لین و لی [18] به اثر پیش گرم بر روی تنش پسماند در جوشکاری فولاد زنگ نزن گرید 304 پرداخته اند. لوله مورد نظر با مشخصات هندسی شامل: قطر خارجی 400 میلی متر، ضخامت 6 میلی متر، طول 300 میلی متر، منطقه جوش به عرض 8 میلی متر و طول منطقه جوش تعمیراتی 126 میلی متر و با پارامترهای جوشکاری مشابه لوله فولاد کربنی مدل سازی شد. شکل 12 توزیع تنش های پسماند محوری در سطح خارجی لوله فولاد زنگ نزن با دماهای پیش گرم مختلف را نشان می دهد.

نتایج نشان می دهند که با افزایش دمای پیش گرم تنش های پسماند فشاری تغییر چندانی نمی کنند ولی پیش گرم اثر مهمی بر روی اندازه و توزیع

فشاری دارد. همان طور که مشاهده می شود، فقط در دمای پیش گرم بالا (700 درجه سانتی گراد) تنش فشاری کاهش تقریباً 25 درصدی دارد. همچنین با افزایش دمای پیش گرم توزیع تنش های پسماند محوری وسیع تر می شود.

مشاهده می شود، توزیع تنش های پسماند محوری در سطوح داخلی و خارجی لوله تقریباً برعکس یکدیگر می باشند. در جوشکاری لوله ها ترکیب تنش های محوری و محیطی به گونه ای است که منطقه جوش شده متمایل به خمش به سمت داخل است. از این رو با بررسی المانی در سطح خارجی لوله از نظر تعادل نیرویی، تنش های حاصله نزدیک خط جوش فشاری و المان های داخلی تحت کشش خواهند بود که این موضوع در منابع نیز به همین شکل مشاهده و گزارش شده است [17].

توزیع تنش پسماند محیطی در سطح خارجی لوله ها برای دماهای

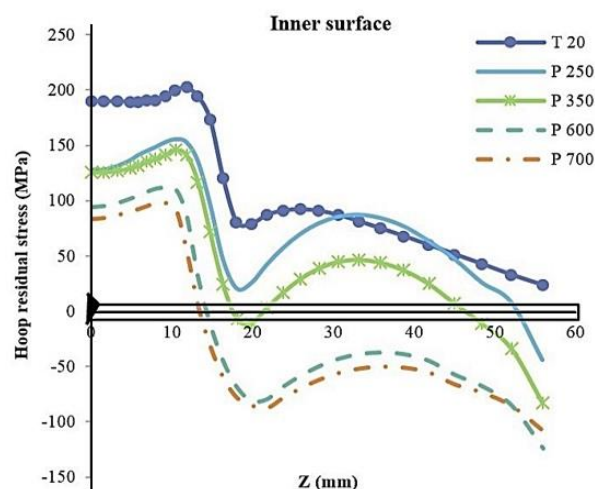


Fig. 9 Hoop residual stress on the inner surface of the repaired pipe with different preheating temperatures

شکل 9 تنش پسماند محیطی در سطح داخلی برای لوله تعمیراتی با دماهای پیش گرم مختلف

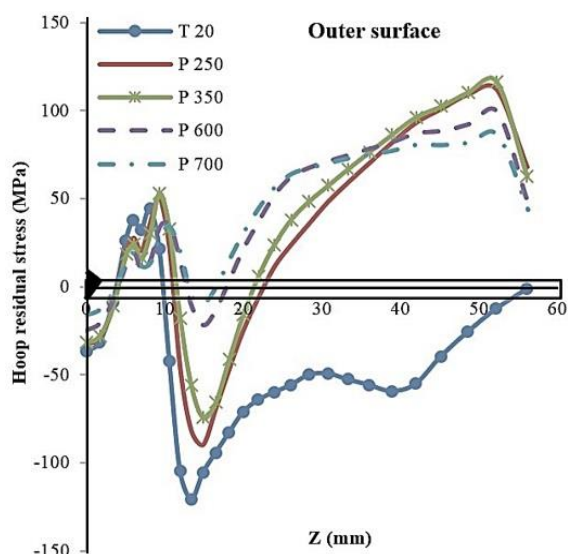


Fig. 11 Hoop residual stresses on the outer surface of the repaired pipe with different preheating temperatures

شکل 11 تنش پسماند محیطی در خارج لوله تعمیراتی با دماهای پیش گرم مختلف

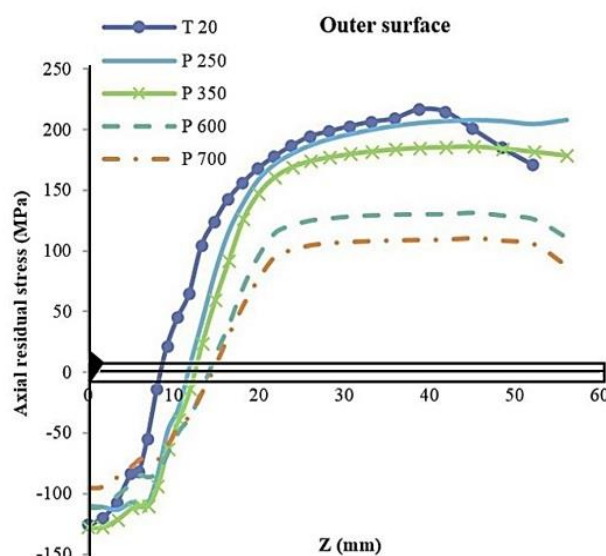


Fig. 10 Axial residual stresses on the outer surface of the repaired pipe with different preheating temperatures

شکل 10 تنش پسماند محوری در سطح خارجی برای لوله تعمیراتی با دماهای پیش گرم مختلف

تنش‌های پسماند محوری کششی دارد. با افزایش دمای پیش گرم تنش‌های کششی از 180 مگاپاسکال در دمای محیط به 120 مگاپاسکال با پیش گرم 600 درجه سانتی‌گراد می‌رسد که کاهش 35 درصدی را نشان می‌دهد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که با افزایش دمای پیش گرم توزیع تنش‌های پسماند محوری وسیع‌تر می‌شود. بزرگ بودن تنش‌های محوری کششی در لوله فولاد کربنی احتمالاً به دلیل بالا رفتن نرخ سرد شدن قطعه و وارد شدن نیروهای بزرگ‌تر بعثت انقباض موضعی ناشی از جوش تعمیراتی است.

شکل 13 توزیع تنش‌های پسماند محوری در سطح داخلی لوله فولاد زنگ‌زن با دماهای پیش گرم مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش دمای پیش گرم تنش‌های

بزرگ بودن تنش‌های محوری کششی در لوله فولاد کربنی احتمالاً به دلیل این است که فولاد زنگ‌زن دچار تسلیم ناشی از کاهش استحکام در دماهای بالا شده و وارد شدن نیروهای بزرگ‌تر بعثت انقباض موضعی ناشی از جوش و تغییر شکل پلاستیک شدیدتر موجب افزایش بیشتر تنش پسماند در بخش فولاد کربنی می‌گردد.

شکل 14 توزیع تنش‌های پسماند محیطی در سطح خارجی لوله فولاد زنگ‌زن را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که پیش گرم اثر ناچیزی بر روی تنش‌های محیطی فشاری دارد. با افزایش دمای پیش گرم تنش‌های پسماند کششی قابل توجهی می‌کنند طوری‌که اندازه تنش محیطی کششی در دمای محیط 135 مگاپاسکال است که این مقدار برای حالت پیش گرم با دمای 600 درجه سانتی‌گراد به 55 مگاپاسکال می‌رسد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان فهمید که افزایش دمای پیش گرم بر روی کاهش اندازه پیک تنش‌های پسماند اثر کمی دارد.

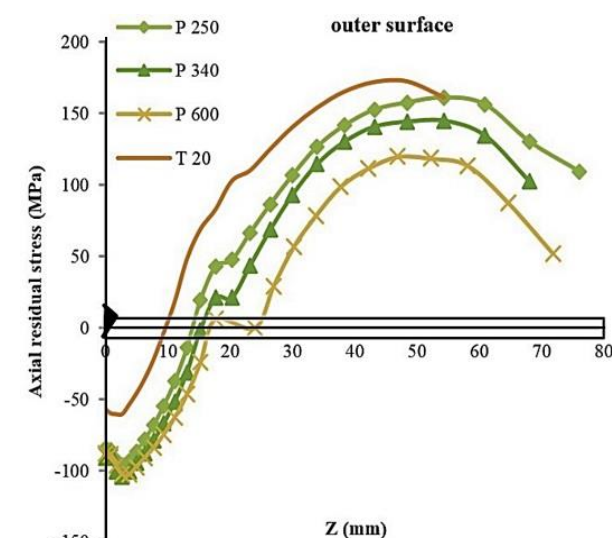


Fig. 12 Axial residual stresses on the outer surface of the repaired stainless steel pipe with different preheating temperatures

شکل 12 تنش پسماند محوری در سطح خارجی لوله تعمیراتی با دماهای پیش گرم مختلف برای فولاد زنگ‌زن

بطور کلی اثر پیش گرم در کاهش تنش‌های پسماند در لوله فولاد زنگ‌زن نسبت به فولاد کربنی بعثت پایین بودن ضریب هدایت حرارتی فولاد زنگ‌زن، کمتر می‌باشد.

شکل 15 توزیع تنش‌های پسماند محیطی در سطح داخلی لوله فولاد زنگ‌زن با دماهای پیش گرم مختلف را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند، با افزایش دمای پیش گرم تنش‌های محیطی کششی تغییر چندانی نمی‌کنند و فقط پیک تنش‌ها از 200 مگاپاسکال در دمای محیط به 150 مگاپاسکال با

شکل 15 توزیع تنش‌های پسماند محیطی در سطح داخلی لوله فولاد زنگ‌زن با دماهای پیش گرم مختلف را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند، با افزایش دمای پیش گرم تنش‌های محیطی کششی تغییر چندانی نمی‌کنند و فقط پیک تنش‌ها از 200 مگاپاسکال در دمای محیط به 150 مگاپاسکال با

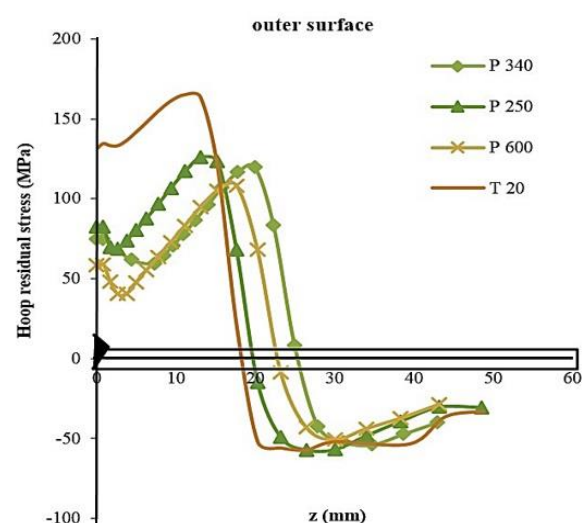


Fig. 14 Hoop residual stresses on the outer surface of the repaired stainless steel pipe with different preheating temperatures

شکل 14 تنش پسماند محیطی در سطح خارجی لوله تعمیراتی با دماهای پیش گرم مختلف برای فولاد زنگ‌زن

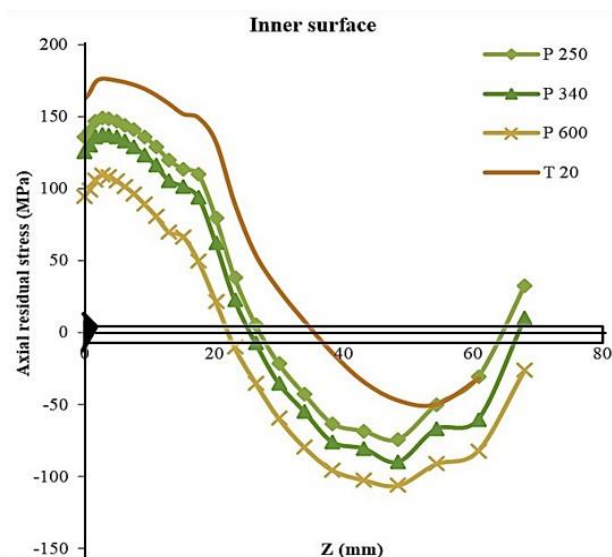


Fig. 13 Axial residual stresses on the inner surface of the repaired stainless steel pipe with different preheating temperatures

شکل 13 تنش پسماند محوری در سطح داخلی لوله تعمیراتی با دماهای پیش گرم مختلف برای فولاد زنگ‌زن

- در لوله فولاد کربنی تنش پسماند محوری در سطح داخلی نزدیک نقطه تسلیم است. با پیش گرم در دماهای بالا میزان تنش‌ها در سطح داخل نمونه‌ها تقریباً به اندازه 60 درصد کاهش پیدا کردند.

- پیش گرم بر روی کاهش تنش‌های پسماند محیطی کششی در سطح داخل و تنش‌های محوری کششی در دو سطوح داخلی و خارجی در لوله فولاد کربنی و تنش‌های محوری و محیطی کششی در سطح خارجی لوله فولاد زنگ‌زن اثر قابل توجهی دارد.

- بطور کلی اثر پیش گرم در کاهش تنش‌های پسماند در لوله فولاد زنگ‌زن نسبت به لوله فولاد کربنی احتمالاً به علت پایین بودن ضریب هدایت حرارتی فولاد زنگ‌زن، کمتر می‌باشد. همچنین با توجه به خواص مکانیکی و حرارتی دو نوع فولاد، فولاد کربنی زودتر از فولاد زنگ‌زن دچار تسلیم ناشی از کاهش استحکام در دماهای بالا شده و تغییر شکل پلاستیک شدیدتر با افزایش دمای پیش گرم موجب کاهش بیشتر تنش‌های پسماند در لوله فولاد کربنی می‌شود.

6- فهرست علائم

A, B	ضرایب وابسته به قطر سوراخ و خواص مکانیکی فلز پایه
a, b, c	مقاطع منبع حرارتی جوشکاری
c	ظرفیت گرمای ویژه (J/kg.°C)
f	کسر حرارت ورودی
I	شدت جریان الکتریکی (A)
Q	حرارت ورودی (Wm ⁻²)
$\bar{q}$	بردار شار حرارتی
q	منبع حرارت حجمی (Jm ⁻³ s ⁻¹)
T	دما (°C)
t	زمان (s)
U	ولتاژ قوس (V)
v	سرعت فرایند جوشکاری (ms ⁻¹)

علائم یونانی

α	ضریب انتقال حرارت (Wm ⁻²)
∇	گرادیان
ε	کرنش
ρ	چگالی (kgm ⁻³)
σ	تنش پسماند (MPa)
η	ضریب راندمان قوس الکتریکی

زیر نویس‌ها

f	جلو
h	حرارت
r	عقب
max	حداکثر
min	حداقل

7- مراجع

- [1] L. Gannon, Y. Liu, N. Pegg, M. Smith, Effect of welding sequence on residual stress and distortion in flat-bar stiffened plates, *Marine Structures*, Vol. 23, No. 3, pp. 385-404, 2010.
- [2] C. Peng-Hsiang, T. Tso-Liang, Numerical and experimental investigations on the residual stresses of the butt weld joints, *Computational Materials Science*, Vol. 29, No. 1, pp. 511-522, 2004.
- [3] A. Joseph, K. Raib-Sanjai, T. Jayakumara, N. Murugan, Evaluation of

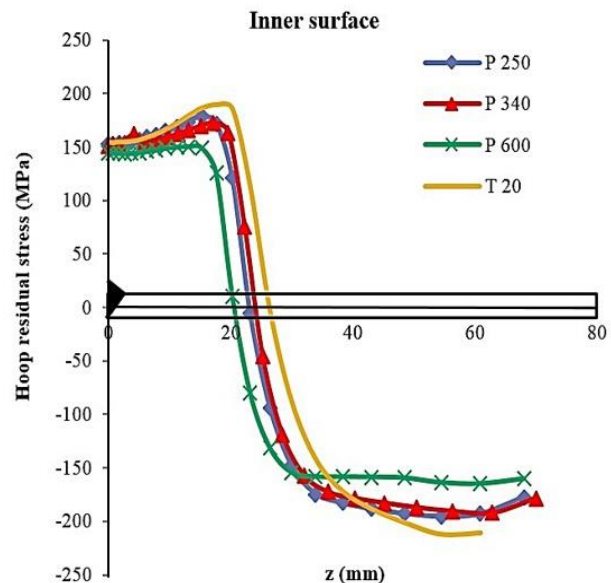


Fig. 15 Hoop residual stresses on the inner surface of the repaired stainless steel pipe with different preheating temperatures

شکل 15 تنش پسماند محوری در سطح داخلی لوله تعمیراتی با دماهای پیش گرم مختلف برای فولاد زنگ‌زن

پیش گرم 600 درجه سانتی‌گراد کاهش پیدا می‌کند.

روند مشابهی از تنش‌های محیطی فشاری با دماهای پیش گرم مختلف مشاهده می‌شود و تنها در دماهای پیش گرم بالا تنش‌های فشاری کاهش می‌یابند. روند مشابهی از توزیع تنش‌های پسماند محیطی در سطوح داخلی و خارجی لوله فولاد زنگ‌زن مشاهده می‌شود. به‌طور کلی اثر پیش گرم بر روی کاهش تنش‌های محیطی کششی در سطح خارجی لوله بیشتر از سطح داخلی آن می‌باشد ولی در مورد تنش‌های فشاری اثر پیش گرم در سطوح داخلی و خارجی تقریباً مشابه است.

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، یک مدل المان محدود برای محاسبه تنش‌های پسماند جوش در جوشکاری تعمیراتی دو نوع فولاد کربنی A106-B و فولاد زنگ‌زن SS TYPE 304 با روش جوشکاری قوس الکتریکی تک پاسه توسعه داده شده است.

توزیع تنش پسماند به دست آمده در این پژوهش با داده‌های اندازه‌گیری شده بوسیله روش کرنش‌سنجی سوراخ مقایسه شدند. رابطه خوبی بین نتایج المان محدود و داده‌های تجربی مشاهده شد. از این رو روش محاسباتی توسعه یافته در این مطالعه برای پیش‌بینی تنش پسماند در جوشکاری تعمیراتی لوله‌های فولاد کربنی و فولاد زنگ‌زن جدار نازک، یک روش کارآمد خواهد بود. نتایج زیر را می‌توان بر اساس دستاوردهای این مطالعه بدست آورد.

- عملیات حرارتی پیش گرم با ایجاد بالانس حرارتی و کاهش شیب حرارتی سرد شدن قطعه از میزان تنش‌های ایجاد شده در اثر انبساط حرارتی و انقباض انجمادی و تغییر شکل‌های پلاستیک کاسته و تأثیر زیادی در کاهش عیوب مکانیکی اعوجاج و تنش‌های پسماند دارد.

- با افزایش دمای پیش گرم تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری تعمیراتی لوله‌ها کاهش پیدا می‌کند که این کاهش در لوله‌های فولاد کربنی محسوس‌تر می‌باشد.

- [11] S. Fricke, E. Keim, J. Schmidt, Numerical weld modeling—a method for calculating weld-induced residual stresses, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 206, No. 2, pp. 139-150, 2001.
- [12] ASTM E837, Standard test method for determining residual stress by the hole drilling strain gauge method, 1995.
- [13] B. Brickstad, B. Josefson, A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 75, No. 1, pp. 11–25, 1998.
- [14] D. Deng, H. Murakawa, Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements, *Computational Materials Science*, Vol. 37, No. 1, pp. 269–277, 2006.
- [15] L. Fenggui, Modeling and finite element analysis on GTAW arc and weld pool, *Computational Materials Science*, Vol. 29, No. 2, pp. 371–378, 2004.
- [16] ABAQUS/standard User's Manual, V 6.14.4, Hibbitt, Karlsson & Sorensen analysis system Inc, 2001.
- [17] A. Paradowska, J. Price, R. Ibrahim, T. Finlayson, The effect of heat input on residual stress distribution of steel welds measured by neutron diffraction, *Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 385–388, 2006.
- [18] Y.C. Lin, K. H. Lee, Effect of preheating on the residual stress in type 304 stainless steel weldment, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 63, No. 1–3, pp. 797-801, 1997.
- [19] P. Chang, T. Teng, Numerical and experimental investigations on the residual stresses of the butt-welded joints, *Computational Materials Science*, Vol. 29, No. 4, pp. 511–522, 2004.
- residual stresses in dissimilar weld joints, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, No. 9, pp. 700–705, 2005.
- [4] J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby, A new finite element model for welding heat source, *Metallurgical Transaction B*, Vol. 15, No. 2, pp. 299–305, 1984.
- [5] J. Goldak, *Modeling Thermal Stresses and Distortions in Welds*, Ohio: ASM International, pp. 71–82, 1990.
- [6] P. Dong, J. K. Hong, P. J. Bouchard, Analysis of residual stresses at weld repairs, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, No. 4, pp. 258–269, 2005.
- [7] T. B. Brown, T. A. Dauda, C. E. Truman, D. J. Smith, D. Memhard, W. Pfeiffer, Predictions and measurements of residual stress in repair welds in plates, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 83, No. 11, pp. 809-818, 2006.
- [8] D. Akbari, I. Sattari-Far, Effect of the welding heat input on residual stresses in butt-welds of dissimilar pipe joints. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 86, No. 11, pp. 769–776, 2009.
- [9] A. Mirzaee-Sisan, A. Fookes, C. Truman, D. Smith, Residual stress measurement in a repair welded header in the as-welded condition and after advanced post weld treatment, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 84, No. 5, pp. 265-273, 2007.
- [10] W. Jiang, B. Wang, J. Gong, S. Tu, Finite element analysis of the effect of welding heat input and layer number on residual stress in repair welds for a stainless steel clad plate, *Materials & Design*, Vol. 32, No. 5, pp. 2851-2857, 2011.